第 42 卷　第 1 期
2025 年 2 月
应　用　力　学　学　报
Chinese Journal of Applied Mechanics
Vol. 42 No. 1
Feb. 2025

DOI:10. 11776/j. issn. 1000-4939. 2025. 01. 021

螺旋加劲大径厚比方钢管混凝土叠合柱偏心受压非线性行为研究

王振山[1],康树宽[1],宗梦媛[1],李哲[1],韦俊[2],卢俊龙[1]

(1. 西安理工大学土木建筑工程学院,710048 西安;2. 苏州科技大学土木工程学院,215000 苏州)

摘　要:大径厚比钢管混凝土构件局部屈曲问题较为突出,在螺旋加劲肋新型约束形式基础上,提出了螺旋加劲方钢管混凝土叠合柱。通过偏心受压试验研究发现,螺旋肋可对大径厚比方钢管形成较好的约束,局部屈曲显著减小,构件承载力与变形能力得到有效提高。基于试验结果,采用 ABAQUS 有限元软件对该新型组合构件进行了参数分析,研究了钢管厚度、螺旋肋宽厚比、钢筋直径及偏心率的影响规律。结果表明:偏心率增大,试件承载力降低,延性增加;减小钢管宽厚比和增加钢筋直径,承载力和延性均有明显提升;螺旋肋宽厚比对试件承载力影响不大。基于数值分析结果,给出了设计建议;并对该叠合柱偏心受压承载力计算方法进行了研究,提出了考虑螺旋肋影响的实用计算公式。

关键词:钢管混凝土;螺旋加劲肋;偏心受压;数值模拟;计算方法

中图分类号:TU398.9　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1000-4939(2025)01-0194-12

Study on the nonlinear behavior of spiral stiffener large diameter-thickness ratio square steel tube concrete composite column under eccentric compression

WANG Zhenshan[1],KANG Shukuan[1],ZONG Mengyuan[1],LI Zhe[1],WEI Jun[2],LU Junlong[1]

(1. School of Civil Engineering and Architecture,Xi'an University of Technology,710048 Xi'an,China;
2. School of Civil Engineering,Suzhou University of Science and Technology,215000 Suzhou,China)

Abstract:The local buckling problem of large-diameter-thickness ratio steel tube concrete members is more prominent. This paper proposes a new restraint form of spiral stiffeners. Through the eccentric compression study of the spirally stiffened concrete-filled square steel tube composite column, it is found that the spiral rib can form a better constraint on the square steel tube with large-diameter-thickness ratio, the local buckling is significantly reduced, and the bearing capacity and deformation capacity of the member are effectively improved. Based on the test results, this paper uses ABAQUS finite element software to analyze the parameters of the new composite component, and study the influence of steel pipe, spiral rib width to thickness ratio, steel bar diameter and eccentricity. . The results show that with the increase of eccentric-

收稿日期:2024-08-24
基金项目:陕西省自然科学基础研究计划面上项目(No. 2024JC-YBMS-383)
通信作者:王振山,副教授。E-mail:wangdayuwang@126.com
引用格式:王振山,康树宽,宗梦媛,等. 螺旋加劲大径厚比方钢管混凝土叠合柱偏心受压非线性行为研究[J]. 应用力学学报,2025,42(1):194-205.
WANG Zhenshan, KANG Shukuan, ZONG Mengyuan, et al. Study on the nonlinear behavior of spiral stiffener large diameter-thickness ratio square steel tube concrete composite column under eccentric compression[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2025, 42(1):194-205.

ity,the bearing capacity of the specimen decreases and the ductility increases. Reducing the width-thickness ratio of steel pipe and increasing the diameter of vertical steel bar can obviously improve the bearing capacity and ductility. The width-thickness ratio of stiffeners has little effect on the bearing capacity of specimens. According to the results of parameter analysis,the design suggestions are given. the calculation method of the eccentric compression bearing capacity of the composite column is studied,and a practical calculation formula considering the influence of the spiral rib is proposed.

Key words:concrete-filled steel tube;spiral stiffener;eccentric compression;numerical simulation;calculation method

钢管混凝土凭借其承载力高、变形能力好、施工方便等优势,在工程领域应用越发广泛。普通钢管混凝土由于管壁较厚,经济效益等降低;大径厚比钢管混凝土可有效减少钢材用量,降低钢管成型难度,较适合竖向荷载要求不高的中层以下建筑。然而,薄壁钢管混凝土易发生局部屈曲问题,核心混凝土失去钢管约束后,构件整体变形能力严重退化。因此,国内外众多学者提出了带约束的钢管混凝土组合构件,并开展了相关研究。

薄壁方钢管混凝土常见约束形式有:设置加劲肋、角部隅撑及对穿拉杆等措施[1]。HAMIDIAN 等[2]对 3 根普通钢管混凝土柱和 12 根不同钢筋间距的螺旋钢筋钢管混凝土柱进行对比试验研究,结果表明,螺旋钢筋能提高构件的抗屈曲性能,且间距越小抗屈曲性能越好。JONES 等[3]研究了设置内环板的钢管混凝土柱弯曲和剪切性能,发现设置内环板使钢管混凝土的强度有所提高,尤其对抗剪强度作用较为明显。YANG 等[4]对设置对拉片及角部隅撑的钢管混凝土柱进行了试验研究,结果表明,角部隅撑及对拉片能够推迟钢管局部屈曲,提高构件延性,其中角部隅撑效果较好。朱长安等[5]分析了不同构造措施对大径厚比方钢管混凝土柱抗屈曲性能影响情况。许成祥等[6]分析了钢筋加劲肋薄壁方钢管混凝土构件受力性能,研究表明,设钢筋加劲肋能够推迟钢管局部屈曲,增加试件承载力。黄宏等[7]进行了 14 个带肋方钢管混凝土短柱受力性能试验研究,并通过数值模拟的方法,分析了加劲肋高厚比和宽厚比的影响规律。龚永智等[8]对配置圆环箍筋及螺旋箍筋的方钢管约束混凝土短柱受压性能进行研究,并讨论了不同约束形式的影响情况。陈志华等[9]对内置螺旋箍筋加劲方钢管混凝土柱的力学性能进行了试验研究,结果表明,螺旋箍筋可有效提高钢管混凝土的承载力,且箍筋间距越小承载力提高越明显。孙焱焱等[10]对普通和单、双肋方钢管混凝土短柱进行了试验研究,研究表明,加劲肋的设置可推迟管壁屈曲,改善试件延性。目前,针对普通钢管及带加劲肋大径厚比钢管混凝土的受压性能研究相对较多。薄壁钢管混凝土构件延性相对较差,设置加劲肋后,局部屈曲得到改善,承载力与变形能力提高。

工程中的加劲形式以直肋为主,其局部约束作用较强,但对于构件整体约束效果并不理想;同时,直肋对构件的横向约束作用不大。本研究结合螺旋箍筋与加劲肋两者的特点,提出了“螺旋加劲肋”约束形式,加劲肋沿钢管螺旋分布,形成一种空间约束,除了提高钢管局部抗屈曲能力外;还可对构件整体与钢管横向变形进行有效约束,以此提升构件受力性能。在螺旋加劲肋的基础上,还提出了螺旋加劲方钢管混凝土叠合柱,该新型组合构件既可发挥钢管混凝土的受力优势,又可利用外部混凝土对核心钢管进行保护,以达到提高抗火及耐腐蚀能力的目的。本研究在偏压试验基础上,利用有限元软件进行参数分析,研究了偏心率、钢管宽厚比、螺旋肋宽厚比等对构件受力性能的影响规律,并提出了该叠合柱偏心受压承载力实用计算方法。研究结果可为该新型组合构件的工程应用提供技术支持。

1　偏压试验概况

1.1　试验介绍

本研究针对普通大径厚比方钢管混凝土柱(Z1)与螺旋肋大径厚比方钢管混凝土柱(Z2)进行偏压试验,混凝土强度、钢材材料性能分别如表 1、表 2 所示。其中:$f_{cu,k}$为混凝土立方体抗压强度标准值;f_{ck}为混凝土轴心抗压强度标准值;f_c为混凝土轴心抗压强度设计值;E_c 为混凝土弹性模量;f_y为钢材屈服强度;f_u为钢材抗拉强度。试件高宽比为 2.94,钢管宽厚比取 220,具体参数如表 3 所示。

表 1 混凝土强度

Tab. 1 Concrete strength

混凝土强度等级	$f_{cu,k}$ /MPa	f_{ck} /MPa	f_c /MPa	E_c/GPa
C30	36.4	24.34	17.39	24.5

表 2 钢材材料性能

Tab. 2 Mechanical properties of steel

类型	f_y/MPa	f_u/MPa	伸长率/%
钢管	278.70	388.93	27.3
加劲肋	256.94	363.79	25.7
钢筋	462.95	625.30	24.6

钢管与加劲肋采用 Q235B 钢，螺旋肋数量为 4 个，螺距为 1 000 mm，钢筋为 Φ14HRB400，混凝土选用 C30 自密实混凝土。2 试件的上下两端焊有刚性端板，为 340 mm × 340 mm 方形钢板，厚度为 20 mm；试件具体形式如图 1 所示。

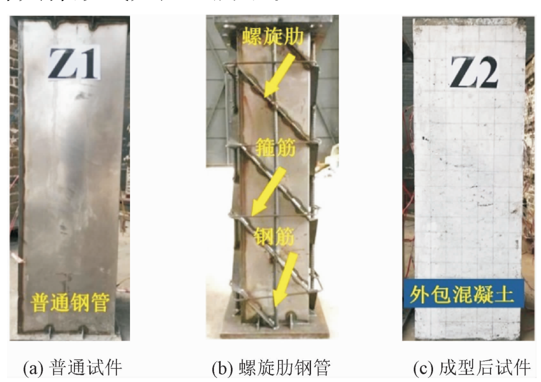


图 1 试件形式

Fig. 1 Forms of test samples

表 3 试件参数

Tab. 3 Parameters of test samples

试件编号	约束形式	尺寸	钢管边长/mm	加劲肋尺寸	壁厚/mm
Z1	–	1 000 mm × 340 mm × 340 mm	340	–	1.0
Z2	螺旋肋	1 000 mm × 340 mm × 340 mm	220	30 mm × 3 mm	1.0

试验荷载偏心率为 0.4，加载装置如图 2 所示。采用分级加载，初始阶段采用荷载控制(50 kN/min)，当试件屈服后采用位移控制(0.1 mm/min)，当荷载降到极限荷载的 85% 后，试验结束。试验情况如图 3 所示。

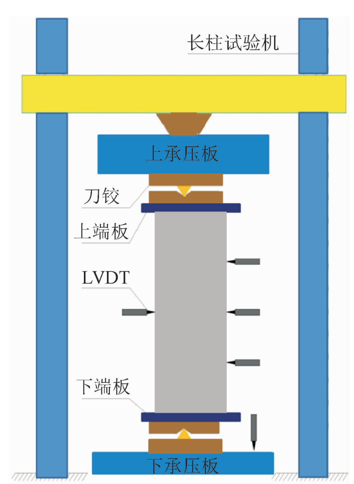


图 2 加载装置图

Fig. 2 Loading device diagram

1.2 试验过程

试件 Z1 加载初期外观未见明显变化，直至荷载达到 850 kN 时，试件受压面距柱顶 200 mm 处出现局部屈曲(图 4a)；荷载继续增加，受压面中部及 2 个侧面受压一侧出现鼓曲现象，荷载增加到1 240 kN 时，荷载增长速度减缓，持续加载，中部和下部处相继产生屈曲(图 4b)。





图 3 试验情况

Fig. 3 Test preparation

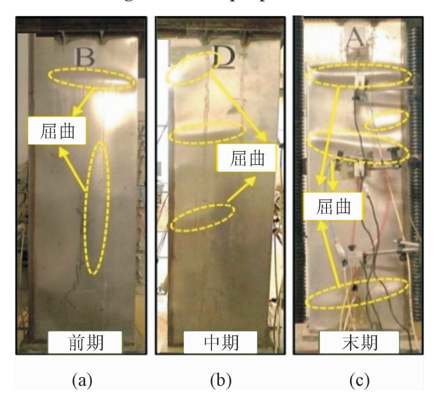


图 4 Z1 破坏现象

Fig. 4 Failure phenomena of Z1

试件加载至 1 775 kN 时，试件到达极限承载力，原有的局部屈曲更加明显；在达到最大荷载后，承载

力开始降低，至 1 600 kN 时，构件侧面受压一侧出现了数道波形鼓曲（图 4c）；继续加载，试件屈曲更为严重，当荷载下降至 85%，Z1 试验结束。

试件 Z2 加载初期无明显试验现象，加载至 970 kN时，试件的受压面上部开始出现竖向微裂缝，同时两侧面的受压面产生微裂缝；加载至 1 200 kN 时，受压面及侧面裂缝向下发展（图 5a）；继续加载，裂缝持续发展，试件的受压区上部、下部均有新裂缝产生（图 5b）；持续加载至 1 790 kN 时，受拉面上部有横向裂缝产生；同时，受压区混凝土出现起皮现象，并伴有轻微脱落。达到极限承载力后，受拉区上部裂缝向两侧延伸，同时试件中部产生新的横向裂缝；继续加载，受压区混凝土破坏加重，混凝土大面积脱落（图 5c）；荷载下降至 85% 后，试验结束。剥离混凝土，钢管的破坏情况如图 5（d）所示，与普通钢管混凝土相比，该核心钢管发生轻微屈曲，位置处于受压区，螺旋加劲肋之间。

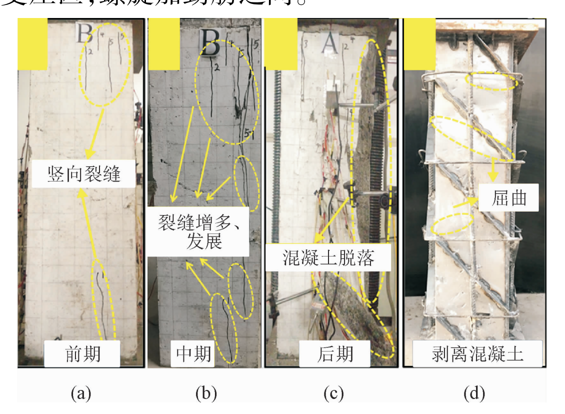


图 5　Z2 破坏现象

Fig. 5　Failure phenomena of Z2

1.3　试验结果

试件的荷载-位移曲线如图 6 所示，初始阶段基本呈线性变化；试件在达到极限承载力后开始下降段，试件 Z1 下降较为平缓。试件 Z2 基本呈两阶段变化，下降初始，速度较快，由于外部混凝土未受到有效约束，刚度与强度退化较快；当外部混凝土逐渐退出工作，内部螺旋肋构件开始发挥作用，曲线下降变缓。试件 Z1 和 Z2 截面尺寸相同，试件 Z2 的极限承载力达到了 2 090 kN，与 Z1 的极限承载力1 775 kN 相比，承载力提高了 17.9%。总体来看，Z1 试件为普通钢管混凝土，钢管可对全截面混凝土进行有效约束，Z2 为钢管-混凝土叠合柱，外部混凝土占比 58%，由于外部混凝土缺少有效约束，一旦开裂，强度与刚度将快速退化，这也是 Z2 试件破坏阶段呈两阶段变化的原因。从变形规律上看，虽然试件 Z2 下降初始速度较快，一旦核心螺旋肋构件作为受力主体后，构件变形能力显著增强；这在一定程度上，反映出螺旋加劲肋的约束作用。

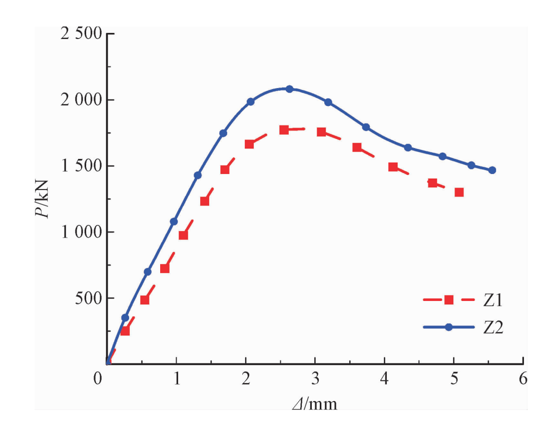


图 6　荷载-位移曲线

Fig. 6　Load-displacement curves

试件的荷载-挠度曲线如图 7 所示。随着荷载增大，跨中挠度增加，当达到极限荷载之后，曲线开始下降，试件 Z2 降速相对平缓。荷载-位移特征值如表 4 所示，两试件承载力裕度基本一致，变形能力相当，安全储备 Z2 略好。

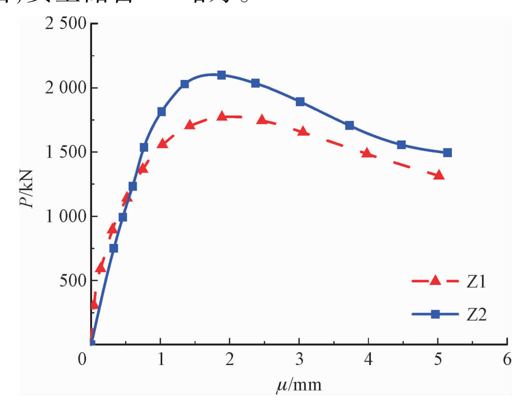


图 7　荷载-挠度曲线

Fig. 7　Load-deflection curves

表 4　荷载-位移特征值

Tab. 4　Load and displacement eigenvalues

试件	屈服荷载 P_y/kN	屈服位移 Δ_y/mm	极限荷载 P_{max}/kN	极限位移 Δ_{max}/mm	破坏荷载 P_u/kN	破坏位移 Δ_u/mm	承载力裕度 P_{max}/P_y	变形能力 Δ_u/Δ_y	安全储备 Δ_u/Δ_{max}
Z1	1 660.1	2.04	1 775.1	2.71	1 508.8	4.16	1.07	2.04	1.54
Z2	1 950.6	1.98	2 093.3	2.5	1 779.3	4.07	1.07	2.01	1.63

2　有限元模拟

2.1　有限元模型的建立

在试验研究的基础上，利用有限元软件 ABAQUS 进行数值模拟分析，研究不同设计参数对构件偏压非线性行为影响规律。

钢材的本构关系采用二次塑流模型，钢材的弹性模量和泊松比分别取 2.06×10^5 MPa 和 0.3。混凝土采用塑性损伤模型模拟，并考虑钢管的套箍约束效应，核心混凝土采用增强单轴受压应力-应变关系模型[11]，弹性模量：$E_c = 4\,730\sqrt{f_c}$，泊松比取 0.2。方钢管和螺旋肋选用四节点减缩积分格式的壳单元（S4R），在厚度上选用 9 个积分点的 Simpson 模型。加载端板和混凝土则选用 8 节点减缩积分格式的三维实体单元 C3D8R。钢管和混凝土的界面关系定义为面-面接触，将混凝土表面定义为主面，钢管表面定义为从面，切线方向二者间的界面摩擦系数取 0.3。在法线方向采用硬接触。螺旋肋和钢管间采用绑定约束模拟焊接，混凝土和加载端板界面关系定义为面-面接触，螺旋肋嵌入外包混凝土中，钢管和加载端板则使用壳体与实体间的耦合约束。有限元模型的荷载、位移和边界条件与试验试件保持一致，有限元模型网格划分如图 8 所示。

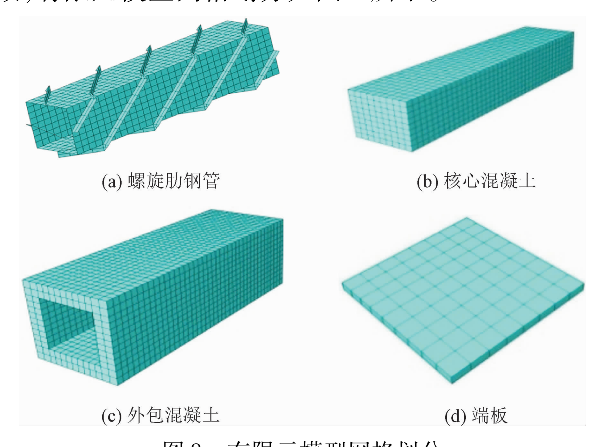


图 8　有限元模型网格划分

Fig. 8　Meshing of finite element simulation

2.2　有限元模型验证性分析

图 9 为有限元计算与试验的荷载-位移曲线对比。可以看出，试验曲线与计算曲线规律吻合较好，数值模型曲线上升段斜率略大，主要是因为未考虑试验材料缺陷，以及钢管与混凝土黏结滑移的影响。与试验相比，数值计算承载力值提高了 8.5%，误差在允许范围内。试验与数值模型破坏情况如图 10 所示，受压区外包混凝土发生破坏，核心钢管应力达到屈服，与试验破坏现象吻合度较高，该模型可较好反映叠合柱偏心受压非线性行为。

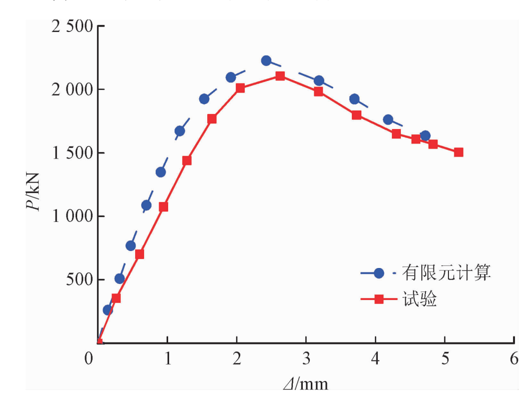


图 9　有限元计算与试验的荷载-位移曲线对比

Fig. 9　Load-displacement curves comparison between the finite element simulation and the test

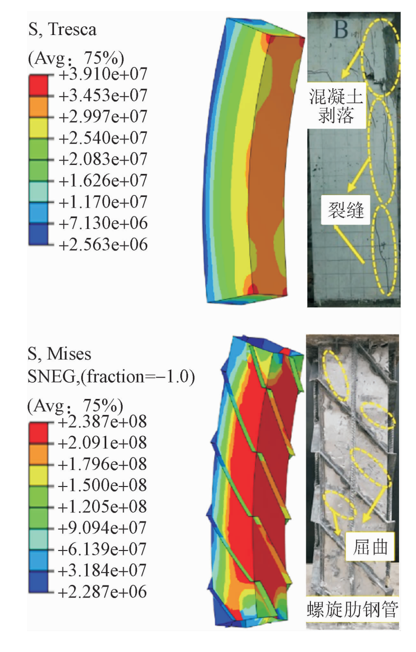


图 10　破坏情况对比（单位：Pa）

Fig. 10　Damage comparison (unit: Pa)

3　参数分析

3.1　参数设定

对叠合柱偏压性能进行参数分析，主要包括：偏心率、钢管宽厚比、螺旋肋宽厚比及钢筋，其余设计参数与试验试件一致，具体参数如表 5 所示。

表 5　试件参数

Tab. 5　Parameters of test samples

模型编号	偏心率	钢管厚度/mm	钢管宽厚比	螺旋肋厚度/mm	螺旋肋宽厚比	竖向钢筋直径/mm
Z2-0.30h_c	0.30	1.0	220.0	3.0	10.0	14
Z2-0.35h_c	0.35	1.0	220.0	3.0	10.0	14
Z2-0.40h_c	0.40	1.0	220.0	3.0	10.0	14
Z2-1.0	0.40	1.0	220.0	3.0	10.0	14
Z2-1.5	0.40	1.5	146.7	3.0	10.0	14
Z2-2.0	0.40	2.0	110.0	3.0	10.0	14
Z2-2L	0.40	1.0	220.0	2.0	15.0	14
Z2-3L	0.40	1.0	220.0	3.0	10.0	14
Z2-4L	0.40	1.0	220.0	4.0	7.5	14
Z2-5L	0.40	1.0	220.0	5.0	6.0	14
Z2-12D	0.40	1.0	220.0	3.0	10.0	12
Z2-14D	0.40	1.0	220.0	3.0	10.0	14
Z2-16D	0.40	1.0	220.0	3.0	10.0	16

3.2　计算结果

3.2.1　偏心率

从不同偏心率下的钢管混凝土柱应力云图（图 11）可以发现，试件变形基本一致，受压区钢管屈服，试件受压面螺旋肋应力随偏心率增加而增大，偏心率越大，螺旋肋对钢管的约束作用越强。

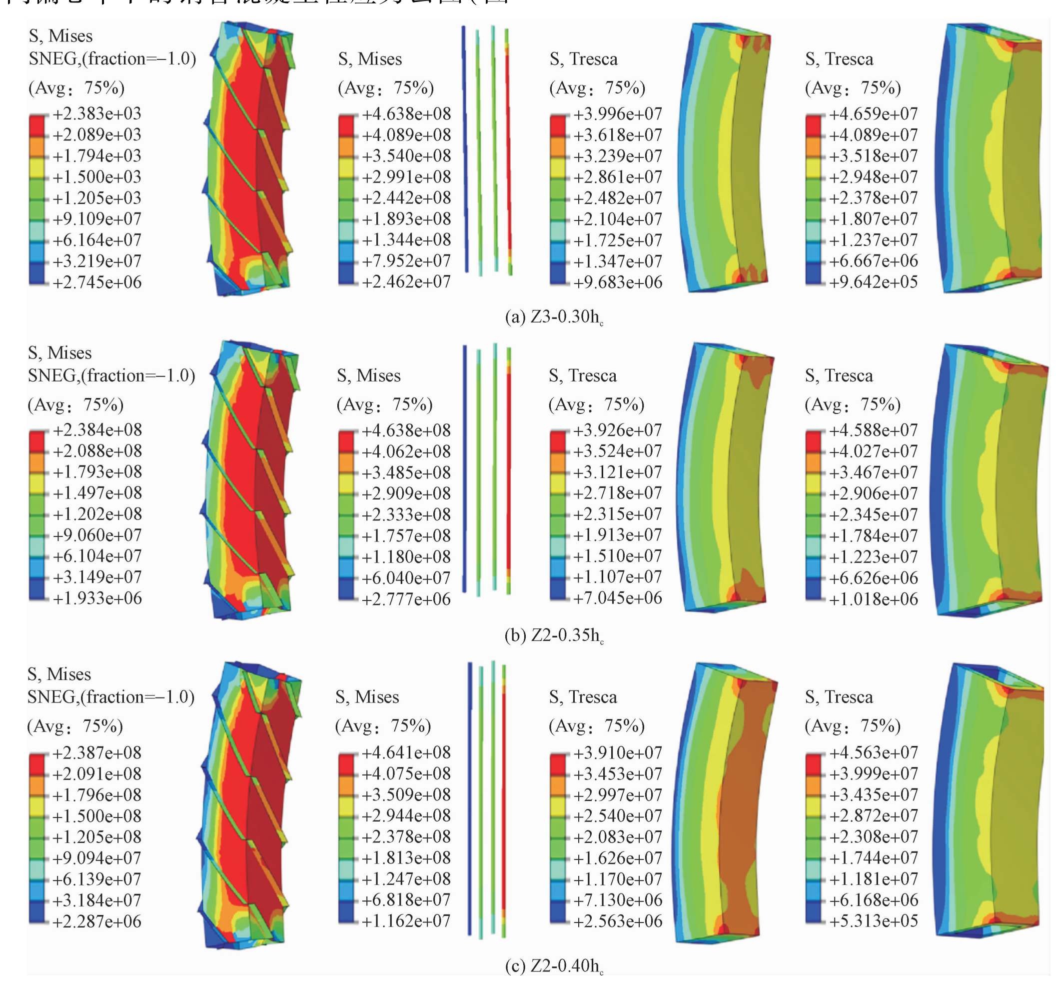


图 11　不同偏心率下应力云图（单位：Pa）

Fig. 11　Stress cloud under different eccentricity (unit: Pa)

同时,随着荷载偏心率的增大,试件截面中和轴向受压区移动,受压区高度有所降低,试件受拉面钢管和钢筋受到的拉力增大,相应混凝土受到的拉力也变大。图 12 为不同偏心率荷载-位移曲线。

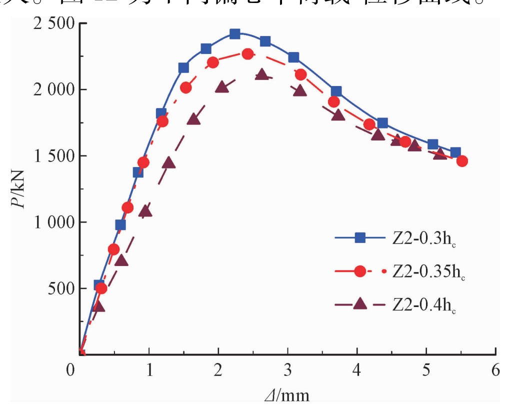


图 12　不同偏心率荷载-位移曲线

Fig. 12　Load-displacement curve of eccentricity

随着荷载偏心率增大,试件的承载力都有所降低,偏心率由 0.30 增加到 0.35 和 0.40 时,试件承载力分别降低了 6.6% 和 12.5%,偏心率越大构件承载力下降越快,但变形能力略有增加。

3.2.2　钢管宽厚比

图 13 为不同钢管宽厚比试件的应力云图。随着钢管厚度增加,钢管受拉区应力值增大,核心混凝土应力也同时增加,增大方钢管厚度,使得钢管套箍强化效果增强,从而提高了混凝土抗压强度及变形能力。

同时,随着钢管厚度增加,试件截面中和轴不断向受拉区移动,增加到 2.0 mm 时,试件几乎全截面受压,受力更加合理。

(a) Z2-1.0

(b) Z3-1.5

(c) Z3-2.0

图 13　不同钢管宽厚比试件应力云图 (单位:Pa)

Fig. 13　Stress cloud under different width-thickness ratio of steel tubes (unit:Pa)

图 14 为不同钢管宽厚比下试件的荷载-曲线。随着钢管宽厚比减小,承载力提高,变形能力也有一定改善。

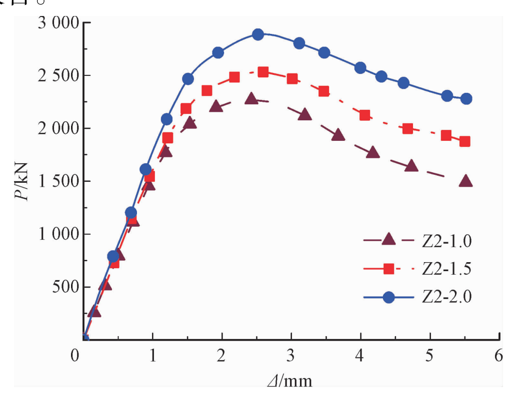


图 14　不同钢管宽厚比下,试件的荷载-位移曲线

Fig. 14　Load-displacement curve of different width-thickness ratio of steel tubes

与 1 mm 厚试件相比,1.5 mm 厚试件承载力提高了 11.6%,变形能力提高了 3.0%,2 mm 厚试件承载力提高了 27.1%,变形能力提高了 6.9%。

3.2.3　螺旋肋宽厚比

图 15 为不同螺旋肋宽厚比下试件的应力云图。随着螺旋肋厚度增加,受压面螺旋肋屈曲面积有所减小,但钢管最大应力值几乎相同,各试件受压区混凝土最大应力值也非常接近,试件受压区高度也无明显变化。图 16 为不同螺旋肋宽厚比下试件的荷载-曲线。荷载位移曲线上升段基本重合,螺旋肋宽厚比越小,曲线下降越缓。螺旋肋厚度增加对提高试件承载力作用不明显,螺旋肋主要是对钢管横向变形进行约束,并延缓钢管局部屈曲。

(a) Z3-2L

(b) Z3-3L

(c) Z3-4L

(d) Z3-5L

图 15　不同螺旋肋宽厚比下试件的应力云图(单位:Pa)

Fig. 15　Stress cloud under different width-thickness ratio of stiffeners (unit:Pa)

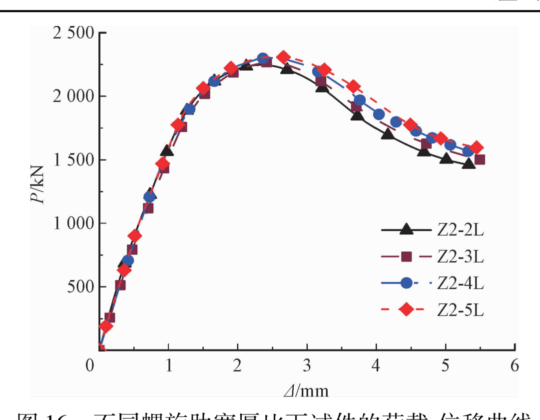


图 16 不同螺旋肋宽厚比下试件的荷载-位移曲线

Fig. 16 Load-displacement curve of different width-thickness ratio of stiffeners

3.2.4 钢筋直径

图 17 为不同钢筋直径下试件应力云图。随着竖向钢筋直径增加,螺旋肋屈服区域不断扩大,螺旋肋对方钢管的约束作用增强,试件核心混凝土受压区应力增大。钢筋直径越大,方钢管对核心混凝土产生的约束作用越强。图 18 为不同钢筋直径下试件的荷载-位移曲线。钢筋直径增大,承载力和变形能力都有所改善。与钢筋直径为 12 mm 的试件相比,钢筋直径 14 mm 的试件承载力提高了 4.2% ,变形能力提高了 1.3% ;钢筋直径 16 mm 的试件承载力提高了 7.0% ,变形能力提高了 3.5% 。

(a) Z3-12D

(b) Z3-14D

(c) Z3-16D

图 17 不同钢筋直径下试件的应力云图(单位:Pa)

Fig. 17 Stress cloud under different diameter of reinforced steel (unit:Pa)

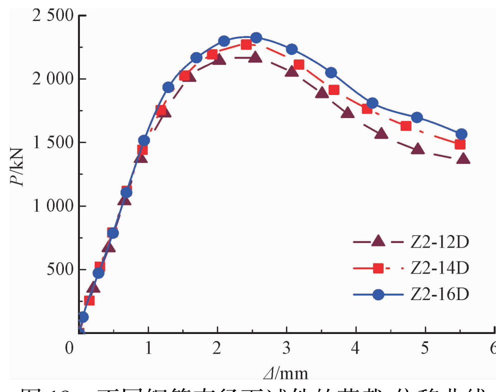


图 18　不同钢筋直径下试件的荷载-位移曲线

Fig. 18　Load-displacement curve of different diameter of reinforced steel

3.3　性能参数对比

表 6 为不同参数构件荷载-位移特征值。图 19 为各试件屈服荷载、峰值荷载和性能随参数变化对比情况。总体来看,构件承载力主要与荷载偏心率、钢管宽厚比(钢管厚度)和钢筋直径有关,螺旋肋宽厚比对承载力影响较小。随着钢管宽厚比减小(钢管厚度增加),荷载提高较快;试件整体性能受螺旋肋宽厚比影响较小,但降低钢管宽厚比、增大钢筋直径可以显著提高试件变形能力。

表 6　不同参数构件的荷载-位移特征值

Tab. 6　Load and displacement eigenvalues

试件	屈服荷载 P_y/kN	屈服位移 Δ_y/mm	极限荷载 P_{max}/kN	极限位移 Δ_{max}/mm	破坏荷载 P_u/kN	破坏位移 Δ_u/mm	承载力裕度 P_{max}/P_y	变形能力 Δ_u/Δ_y	安全储备 Δ_u/Δ_{max}
Z2-0.30h_c	2 408.6	1.61	2 588.6	2.19	2 200.3	3.44	1.07	2.14	1.57
Z2-0.35h_c	2 196.3	1.60	2 417.9	2.24	2 055.2	3.56	1.10	2.22	1.59
Z2-0.40h_c	2 081.8	1.57	2 265.8	2.25	1 925.9	3.66	1.09	2.33	1.63
Z2-1.0	2 081.8	1.57	2 265.8	2.25	1 925.9	3.66	1.09	2.33	1.63
Z2-1.5	2 257.2	1.66	2 528.2	2.50	2 149.0	3.99	1.12	2.40	1.60
Z2-2.0	2 552.8	1.79	2 879.7	2.53	2 447.7	4.46	1.13	2.49	1.76
Z2-2L	2 014.9	1.55	2 241.0	2.31	1 904.9	3.59	1.11	2.32	1.55
Z2-3L	2 081.8	1.57	2 265.8	2.25	1 925.9	3.66	1.09	2.33	1.63
Z2-4L	2 111.2	1.60	2 291.9	2.38	1 948.1	3.81	1.09	2.38	1.60
Z2-5L	2 118.2	1.64	2 314.3	2.43	1 967.2	3.88	1.09	2.37	1.60
Z2-12D	1 990.6	1.57	2 173.7	2.39	1 847.6	3.60	1.09	2.30	1.51
Z2-14D	2 081.8	1.57	2 265.8	2.25	1 925.9	3.66	1.09	2.33	1.63
Z2-16D	2 122.5	1.64	2 326.6	2.43	1 977.6	3.90	1.10	2.38	1.60

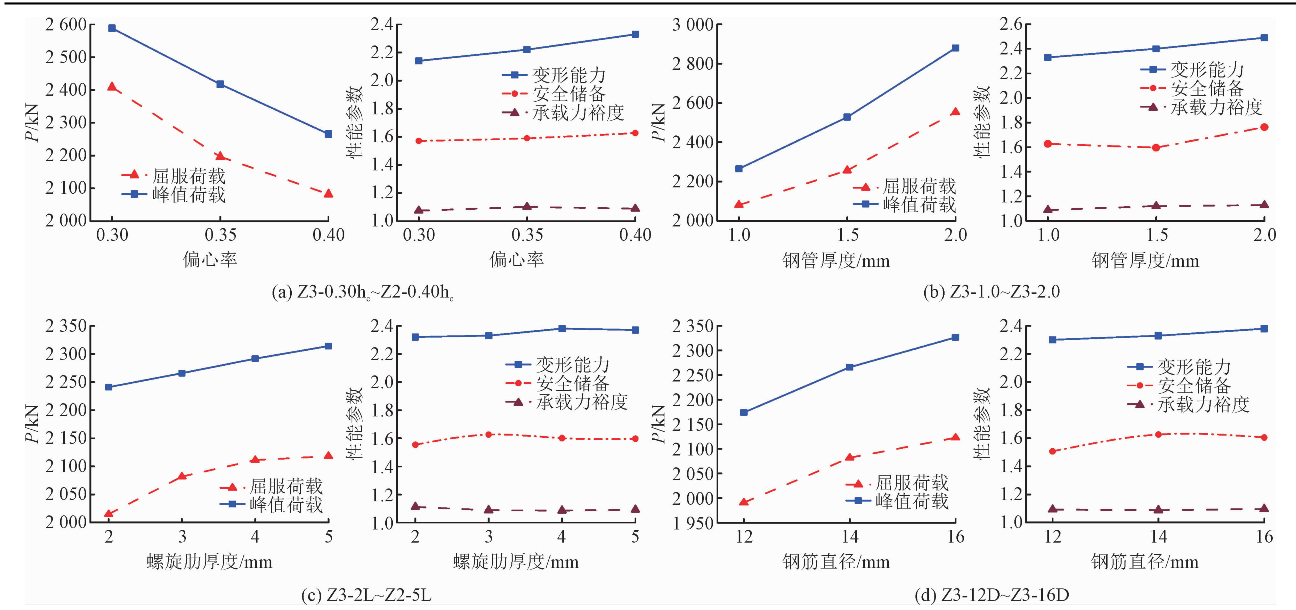


图 19　荷载及性能参数对比

Fig. 19　Load and performance parameter comparison

4 承载力计算

根据螺旋肋薄壁钢管混凝土叠合柱数值分析结果,对其进行承载力计算。经过分析,假定试件承载力由外包混凝土、螺旋肋钢管、竖向钢筋、核心混凝土 4 部分构成,采用叠加理论进行叠合柱承载力计算,即

$$N_u = A_{s1}f_{y1} + 0.75A_{c1}f_{c1} + A_{s2}f_{y2} + \alpha A_{c2}f_{c2} \quad (1)$$

式中:A_{s1} 为钢筋截面积;f_{y1} 为钢筋屈服强度;A_{c1} 为外包混凝土截面积;f_{c1} 为外包混凝土轴心抗压强度;A_{s2} 为钢管截面积;f_{y2} 为钢管屈服强度;f_{c2} 为核心混凝土轴心抗压强度;A_{c2} 为核心混凝土面积。

为了考虑螺旋肋对钢管横向变形的影响,本研究采用材料强度增大系数 α,来反映螺旋肋钢管约束对核心材料抗压强度的影响。由于外部混凝土未受到任何约束,在核心钢管横向变形影响下,强度发生降低,根据试验情况,取外包混凝土强度折减系数为 0.75。根据有限元分析得到的各试件偏压承载力,考虑偏心率折减系数,利用蔡绍怀等[12]经验公式对偏压承载力进行修正,得到叠合柱轴压承载力。

$$\varphi_e = \frac{1}{1 + 1.85\dfrac{1}{e_0/r_c}} \quad (2)$$

$$N_e = N_u\varphi_e \quad (3)$$

式中:φ_e 为偏心率折减系数;e_0/r_c 为荷载偏心率;N_e 为偏压承载力。

将轴压承载力代入式(1),即可得到 α 值。套箍系数反映出组成钢管混凝土截面的钢材对核心混凝土的约束效应,考虑螺旋肋对钢管的约束作用,得到螺旋肋钢管套箍系数 ξ,即

$$\xi = \frac{A_{s2}f_{y2}(1 + \delta)}{A_{c2}f_{c2}} \quad (4)$$

$$\delta = 0.01b/t + 0.02L/D + 0.05n \quad (5)$$

式中:δ 为螺旋肋约束钢管增强系数;b/t 为螺旋肋的宽厚比;L/D 为螺旋肋螺距;n 为螺旋肋数量。分别计算各个试件的 α 值与 ξ 值,通过拟合得出 ξ 与 α 的关系,即

$$\alpha = 1 + 2.3221\xi^{1.0271} \quad (6)$$

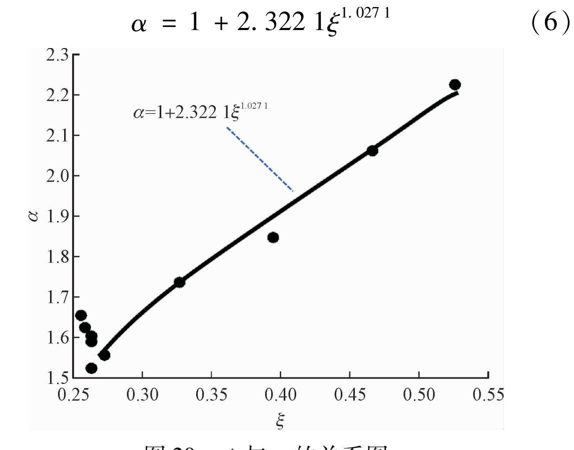


图 20 ξ 与 α 的关系图

Fig. 20 The diagram of ξ and α

利用上述公式,对该叠合柱偏心受压承载力进行计算,结果见表 7 所示,承载力计算值与模拟值之比基本在 5% 以内,计算精度较好。

表 7 计算结果

Tab. 7 Calculation results

试件	ξ	α	偏压承载力计算值 N_1	偏压承载力模拟值 N_2	N_1/N_2
Z2-1.0	0.263 0	1.589 0	2 265.3	2 265.8	0.999 8
Z2-1.5	0.394 5	1.893 2	2 562.6	2 528.2	1.013 6
Z2-2.0	0.526 0	2.200 3	2 862.1	2 879.7	0.993 9
Z2-2L	0.272 4	1.610 7	2 281.6	2 241.0	1.018 1
Z2-3L	0.263 0	1.589 0	2 265.3	2 265.8	0.999 8
Z2-4L	0.258 3	1.578 1	2 257.3	2 291.9	0.984 9
Z2-5L	0.255 4	1.571 6	2 252.5	2 314.3	0.973 3
Z2-12D	0.263 0	1.589 0	2 222.0	2 173.7	1.022 2
Z2-14D	0.263 0	1.589 0	2 265.3	2 265.8	0.999 8
Z2-16D	0.263 0	1.589 0	2 315.7	2 326.6	0.995 3

5 结 论

通过螺旋加劲大径厚比方钢管混凝土叠合柱偏心受压非线性行为研究,主要结论如下。

1)普通钢管混凝土柱破坏模式为钢管外鼓屈曲;螺旋加劲钢管混凝土叠合柱破坏模式为外包受压区混凝土开裂、剥离,受拉区混凝土横向开裂,钢

管沿螺旋肋之间发生轻微局部屈曲。

2)该新型叠合柱达到极限承载力后,性能退化呈 2 阶段变化,外包混凝土退出工作前,退化速度较快;随后,螺旋肋逐渐发挥作用,性能退化变缓。

3)螺旋加劲试件与普通钢管混凝土相比刚度更大,承载力提高了 17.8%,变形能力基本相当。

4)有限元参数分析表明,随着偏心率增大,承载力随之降低,延性有所提高;钢管厚度增加,不仅增加了钢管自身强度,还可提高钢管套箍效应,提升构件承载力和延性;钢筋直径增加,试件承载力和延性提高;螺旋肋宽厚比对承载力影响不大,其主要作用为约束钢管整体与横向变形,延缓局部屈曲。

5)根据试验及数值分析结果,提出了螺旋加劲钢管混凝土叠合柱承载力实用计算方法,并给出设计建议,钢管宽厚比为 100 ~ 120,螺旋肋宽厚比宜取值 10,钢筋直径为 16 ~ 18 mm。

参考文献:

[1] 周绪红,刘永健,姜磊,等. PBL 加劲型矩形钢管混凝土结构力学性能研究综述[J]. 中国公路学报,2017,30(11):45-62.
ZHOU Xuhong, LIU Yongjian, JIANG Lei, et al. Review on mechanical behavior research of concrete filled rectangular hollow section tube stiffened with PBL[J]. China journal of highway and transport,2017,30(11):45-62(in Chinese).

[2] HAMIDIAN M R, JUMAAT M Z, ALENGARAM U J, et al. Pitch spacing effect on the axial compressive behaviour of spirally reinforced concrete-filled steel tube (SRCFT)[J]. Thin-walled structures,2016,100:213-223.

[3] JONES M H, WANG Y C. Shear and bending behaviour of fin plate connection to concrete filled rectangular steel tubular column — development of a simplified calculation method[J]. Journal of constructional steel research,2011,67(3):348-359.

[4] YANG Y L, WANG Y Y, FU F. Effect of reinforcement stiffeners on square concrete-filled steel tubular columns subjected to axial compressive load[J]. Thin-walled structures,2014,82:132-144.

[5] 朱长安,许成祥. 薄壁方钢管混凝土柱防屈曲构造措施的设计探讨[J]. 长江大学学报(自然科学版),2008,5(4):378-380.
ZHU Chang'an, XU Chengxiang. Design and selection of constructional measures to restrict local buckling of concrete filled thin-walled square steel tube columns[J]. Journal of Yangtze University (natural science edition),2008,5(4):378-380(in Chinese).

[6] 许成祥,朱长安,许淑珍. 设置钢筋加劲肋薄壁方钢管混凝土短柱试验研究[J]. 建筑结构学报,2009,30(增刊 2):231-236.
XU Chengxiang, ZHU Chang'an, XU Shuzhen. Experimental research on concrete-filled square thin-walled steel tubular stub columns with steel bar stiffeners[J]. Journal of building structures, 2009,30(S2):231-236(in Chinese).

[7] 黄宏,张安哥,李毅,等. 带肋方钢管混凝土轴压短柱试验研究及有限元分析[J]. 建筑结构学报,2011,32(2):75-82.
HUANG Hong, ZHANG Ange, LI Yi, et al. Experimental research and finite element analysis on mechanical performance of concrete-filled stiffened square steel tubular stub columns subjected to axial compression[J]. Journal of building structures,2011,32(2):75-82(in Chinese).

[8] 龚永智,付磊,丁发兴,等. 方钢管约束混凝土轴压短柱承载力研究[J]. 建筑结构学报,2016,37(增刊 1):239-244.
GONG Yongzhi, FU Lei, DING Faxing, et al. Bearing capacity of axially loaded stirrup confined concrete-filled square steel tubular stub columns[J]. Journal of building structures,2016,37(S1):239-244(in Chinese).

[9] 陈志华,杜颜胜,周婷. 配螺旋箍筋方钢管混凝土柱力学性能研究[J]. 建筑结构,2015,45(20):28-33.
CHEN Zhihua, DU Yansheng, ZHOU Ting. Study on mechanical performance of spiral stirrup-confined concrete-filled square steel tubular columns[J]. Building structure,2015,45(20):28-33(in Chinese).

[10] 孙焱焱,王振波,盛超,等. 带肋方钢管混凝土短柱承载力及延性研究[J]. 应用力学学报,2017,34(1):136-141.
SUN Yanyan, WANG Zhenbo, SHENG Chao, et al. The experimental research and finite element analysis of mechanics behavior of short concrete-filled square steel tubular columns with ribs[J]. Chinese journal of applied mechanics,2017,34(1):136-141(in Chinese).

[11] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]. 福州:福州大学,2005.

[12] 蔡绍怀,邸小坛. 钢管混凝土偏压柱的性能和强度计算[J]. 建筑结构学报,1985,6(4):32-42.
CAI Shaohuai, DI Xiaotan. Behaviour and ultimate strength of concrete-filled steel tubular columns under eccentric loading[J]. Journal of building structures,1985,6(4):32-42(in Chinese).

(编辑　张璐)